DOI:10.11931/guihaia.gxzw201809008

重金属镍胁迫对向日葵幼苗生理生化特性的影响

曾小飚[1]，唐健民[2*]，朱成豪[2,3]，邹蓉[2]，史艳财[2]，韦霄[2]，蔡丽华[1]

（1. 百色学院，农业与食品工程学院，广西 百色 533000；2. 广西壮族自治区中国科学院广西植物研究所，广西 桂林 541006；3. 桂林医学院，广西 桂林 541004）

摘 要：试验以向日葵幼苗为试材，采用营养液培养法探索重金属镍胁迫对其生理生化指标的影响，揭示向日葵对镍胁迫的响应机制和幼苗生长发育的影响研究，为镍污染环境修复提供一定的科学依据。结果显示：低浓度的镍胁迫（≤10 mg•L^{-1}）有利于幼苗的生长，高浓度的镍胁迫（≥50 mg•L^{-1}）对幼苗具有明显的抑制作用。随着镍胁迫浓度逐渐增加，向日葵幼苗各项生理生化指标的变化较大，其中叶绿素、可溶性糖（SS）、可溶性蛋白（SP）、过氧化物酶（POD）活性、游离脯氨酸（Pro）的含量均在 1~10 mg•L^{-1} 呈先上升趋势，50~100 mg•L^{-1} 呈下降的趋势；丙二醛（MDA）含量则呈现持续上升趋势。研究表明：向日葵幼苗对低浓度（1~10 mg•L^{-1}）镍胁迫能通过自身调节，增加 POD、Pro 和 MDA 等物质的含量来提高对生态环境的抗逆能力，说明向日葵幼苗对重金属镍具有一定抗性，而高浓度（50~100 mg•L^{-1}）镍胁迫会破坏其自身防御系统，影响幼苗的生长发育。

关键词：向日葵幼苗，镍胁迫，生长，生理生化特性，响应机制

Effects of heavy metal nickel stress on physiological-biochemical characteristic of *Helianthus annuus* seedings

ZENG Xiaobiao[1], TANG Jianmin[2*], ZHU Chenghao[2.3], ZOU Rong[2], SHI Yancai[2], WEI Xiao[2], CAI Lihua[1]

(1.*College of Agriculture and Food Engineering, Baise University*, Baise 533000, Guangxi , China; 2.*Guangxi Institute of Botany Chinese Academy of Science*s, Guilin 541006, Guangxi, China; 3.*College of Pharmacy, Guilin Medical University*, Guilin 541004, Guangxi, China)

Abstract: In this paper, nutrient solution culture experiments were probed the affection of the heavy metal nickel on physiological and biochemical characteristic by *Helianthus annuus* seedlings as material, revealed the response mechanism and the seedling growth influence on nickel stress, provided some scientific basis for the environmental restoration of nickel pollution. The results showed that low nickel concentration (≤10 mg•L^{-1}) was beneficial to the seedlings growth, and high nickel concentration (≥50 mg•L^{-1}) had obvious inhibitory effected on seedlings. With the increasing nickel concentration, the physiological and biochemical indexes changed

基金项目：广西自然科学基金（2017GXNSFBA198011）；广西植物研究所基本业务费（桂植业 18013，18014）；柳州市科技攻关项目（2016B050202）；地方高校国家级大学生创新创业训练计划项目（20140609013）；2015 广西高校优势特色专业建设项目——百色学院亚热带农业产业专业群[桂教高教〔2015〕41 号[Supported by the Guangxi Natural Science Foundation (2017GXNSFBA198011); Fundamental Research Fund of Guangxi Institute of Botany（18013，18014）; Scientific and Technological Project of Liuzhou(2016B050202); National College Students Innovation and Entrepreneurship Training Program in Local Universities（20140609013）; Guangxi University Featured Specialty Construction Project in 2015（〔2015〕41]。

作者简介： 曾小飚(1971-)，男，广西百色人，本科，副教授，研究方向为两栖爬行动物多样性及植物逆境生理，（E-mail）4442376767@qq.com。

通信作者：唐健民，硕士，助理研究员，研究方向为保护生物学及抗性生理研究，（E-mail）690814668@qq.com。

greatly, which chlorophyll, soluble sugar (SS), soluble protein (SP), peroxidase (POD) activity, free proline (Pro); all of their content increased in 1-10 mg•L^{-1}, and decreased in 50-100 mg•L^{-1}; but the content of malondialdehyde (MDA) continued to rise. Studies showed that the seedlings could used autoregulation to improve resistibility by increasing POD、Pro and MDA in low-nickel concentration (1-10 mg•L^{-1}) , indicated seedings have certain resistance to heavy metal nickel. while high concentration (50-100 mg•L^{-1}) nickel stress would destroyed its own defense system, affected the growth and development of seedlings.

Keywords: *Helianthus annuus* seedlings, Nickel stress, growth, physiological-biochemical characteristic, response mechanism

土壤是人类生存的基础，随着我国社会的进步和工业的不断发展，土壤生态环境状况十分严峻，土壤重金属污染问题日趋严重。重金属借助风力、水力以及化学迁移等方式进入到土壤中（白玉杰，2018），在土壤中富集无法被微生物降解，造成植物吸附后导致生理功能紊乱，影响植物生长发育和生存环境的变化。由于重金属污染的长期性和不可逆性（吕学研，2014），研究重金属污染的防治和修复显得十分迫切；镍是土壤中广泛分布的金属污染物之一，根据《全国土壤污染状况调查公报》显示，我国 Ni 污染超标率为 4.8%，镍的污染研究已成为人们关注的热点。随着对重金属镍的的研究不断开展，有大量的文献报道，主要研究集中在对玉米（王丽娜，2014）、板蓝根（王兵，2014）和甜菜（巴青松，2017）等作物的生理生化影响；但关于观赏性的重金属镍富集植物的研究报道较少，研究观赏性植物对重金属镍的富集性种植和土壤修复具有重要意义。

向日葵（*Helianthus annuus*）别名朝阳花、望日莲、太阳花，一年生草本，是菊科向日葵属的植物。高 1~3.5 m，花期 7~9 月，花色有金黄色、红色及复色等，具有非常高的观赏价值，广泛用于公园花境营造、盆花、染色花及庭院美化等领域（徐惠风等，2003）。而且向日葵茎干直，根系较发达，喜光照，生长周期短，生物量大，对重金属有较强的富集性（郭平等，2007）。

该试验针对向日葵进行研究，利用镍元素在不同浓度下所配成的混合营养液进行培养，研究不同浓度镍胁迫下对向日葵生长发育和生理生化指标的影响；从形态指标和生理生化指标两个层次分析镍胁迫对其的影响，旨在探索镍胁迫对幼苗生长的影响程度和向日葵幼苗对镍胁迫的响应机制；为确定镍元素对观赏向日葵生长发育的影响和镍污染环境修复提供一定的科学依据。

1　材料与方法

1.1 材料

向日葵种子为金星 1 号，购于百色城西蔬菜种子店。Hoagland 营养液的配方：硝酸钙 945 mg•L^{-1}；硝酸钾 607 mg•L^{-1}；磷酸铵 115 mg•L^{-1}；硫酸镁 493 mg•L^{-1}；铁盐溶液 2.5 ml•L^{-1}；微量元素 5 ml•L^{-1}；pH=6.0.

1.2 方法

1.2.1 种子萌发及幼苗培育

精选饱满的向日葵种子，用 1/1 000 的高锰酸钾溶液进行表面消毒 30 min，蒸馏水清洗 3 次，置于垫有纱布的平底托盘中，在（25±1）℃下萌发。待四分之三的种子萌芽后，将其植入装有洁净细砂的塑料杯中，用新配置的 Hoagland 培养液浇灌，自然条件下培养一段时

间后，挑选长势一致（高 15cm）的幼苗分为 6 组，每组 30 棵，供镍胁迫实验用。

1.2.2　重金属镍胁迫

分别用浓度为 0、1、5、10、50、100 mg•L^{-1} 的镍胁迫液（分别取一定质量的 $NiSO_4$ • $6H_2O$ 溶于 1/2Hoagland 培养液中）浇灌向日葵幼苗，于阳光充足的条件下培养，并统一在植株高于土壤表面约 2 cm 处用记号笔做好标记，便于以后从此标记处测量株高，胁迫 12d 后对向日葵幼苗做各项生理生化指标测定。

1.3　向日葵幼苗叶片生理生化指标的测定

分别对每个胁迫浓度的向日葵幼苗叶片进行采集、提取测定；相同指标所取叶片的形态学位置相同。叶绿素含量测定采用 80%丙酮萃取法（赵世杰，1998）；丙二醛（MDA）与可溶性糖（SS）含量测定分别采用硫代巴吡妥酸（TBA）法和蒽酮法（李合生，2000）；过氧化物酶（POD）活性测定采用愈创木酚法（张治安，2004）；可溶性蛋白（SP）含量测定采用考马斯亮蓝染色法；游离脯氨酸（Pro）含量测定采用酸性茚三酮法等（邹琦，2000）。以上实验都做 3 次重复，株高用游标卡尺测量。

1.4　数据处理及分析

利用 Excel 和 Origin 2015 软件对所得数据进行处理分析及制图。

2　结果与分析

2.1　镍胁迫对向日葵幼苗株高及形态的影响

株高作为衡量植物生长特征的重要指标之一；株高的变化反应植物的生长状态。由图 1 所示，在低浓度区间，1 mg•L^{-1} 至 10mg•L^{-1} 向日葵幼苗株高逐渐增高，叶片直立绿色，说明低浓度的镍胁迫有利于植株的生长；随着浓度升高，50 mg•L^{-1} 株高的增幅显著的低于对照组，叶片逐渐弯曲、萎蔫的现象；在 100 mg•L^{-1} 镍胁迫下，向日葵幼苗叶片已发黄、出现斑点，并伴随着萎蔫现象，说明此阶段向日葵幼苗叶片的生长受到了严重抑制。

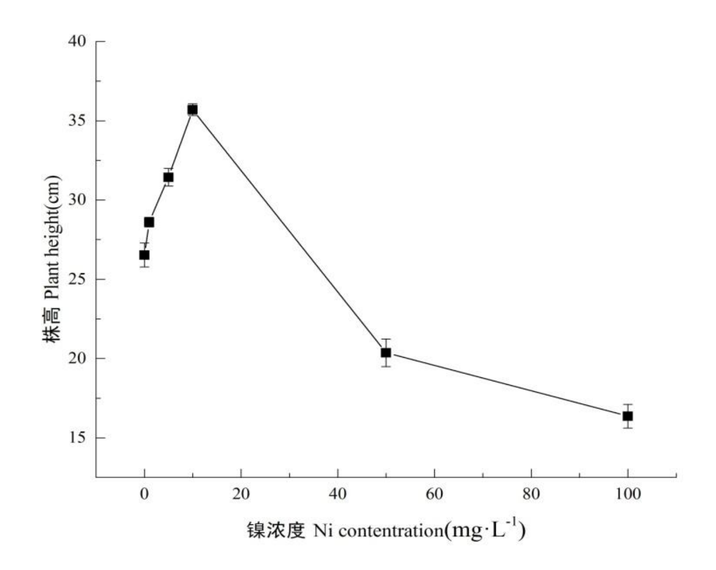


图 1　镍胁迫对向日葵幼苗株高的影响

Fig.1 Effect of Nickel stress on plant height of *Helianthus annuus* seedlings

2.2 镍胁迫对向日葵幼苗叶绿素含量的影响

植物叶绿素主要包括叶绿素 a 与叶绿素 b，植物光合作用离不开叶绿素，光合作用的强弱直接影响植物体内有机物的合成。叶绿素含量减少，叶片失绿，重者导致死亡。由图 2 可以看出：在 1~5 mg•L^{-1} 浓度胁迫下，镍浓度升高，叶绿素 a 含量随之增加，但上升幅度不大，分别增加了 2.4%、8.1%；但是浓度 10 mg•L^{-1} 胁迫下，增加了 17.8%，上升显著；当镍胁迫浓度在 50~100 mg•L^{-1} 时，叶绿素 a 含量则下降明显，分别降低了 5.9%、19.9%。最高胁迫浓度导致叶绿素 a 减少的量远高于最低胁迫浓度促进增长的量。可见，1~10 mg•L^{-1} 镍浓度促进叶绿素 a 的合成，增强光合作用效率，50~100 mg•L^{-1} 镍浓度对向日葵幼苗毒害较深。而叶绿素 b 含量分别比对照组增加了 10.4%、11.6%、15.9%，呈持续上升。叶绿素 b 含量达到峰值之后，开始大幅度下降，受镍胁迫浓度影响较大，相对于只用营养液培养组（比对照）降低了 19.2%、42.3%。叶绿素 b 在重金属镍的影响下，其含量也下降幅度远远大于上升幅度。由此可见，在向日葵幼苗生长发育过程中，低浓度镍对叶绿素 b 的合成同样有促进作用，高浓度下光合作用效率降低。综合来看，叶绿素 a 与叶绿素 b 对镍毒害的敏感程度有很大差别，镍对叶绿素 b 的作用力更大，毒害更深。

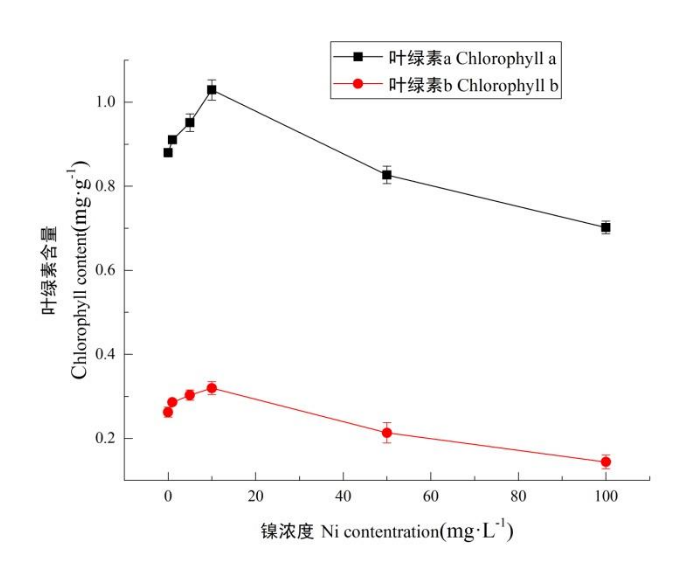


图 2　镍胁迫对向日葵幼苗叶片中叶绿素 a、b 含量的影响

Fig.2 Effect of Nickel stress on chlorophyll a, b content in *Helianthus annuus* seedling leaves

2.3 镍胁迫对向日葵可溶性糖含量的影响

可溶性糖（SS）是植物体光合作用的产物，以单糖为主，为生命活动提供能量，逆环境下，这类小分子化合物可以作为渗透调节剂维持渗透平衡。其含量增加可以降低重金属毒害机体，提高植物体的抗逆能力。

由图 3 可知，当镍胁迫浓度≤10 mg•L^{-1} 时，可溶性糖在向日葵叶片中的含量明显增加。随着不同浓度胁迫液加入 12 d 后，可溶性糖迅速增加 14.2%，之后逐渐增加了 18.2%、29.3%，可溶性糖最大增加量是 10 mg•L^{-1} 时的 2.07 倍，当胁迫浓度增加到 50 mg•L^{-1} 时，可溶性糖含量锐减，增加量达到最低。1 ~10 mg•L^{-1} 镍处理后，可溶性糖含量持续增加；50 ~100 mg•L^{-1} 镍处理后，含量明显下降，经 100 mg•L^{-1} 镍处理后与对照组相比，可溶性糖含量减少了 16.1%。可以看出向日葵叶片中可溶性糖含量的变化趋势呈先上升后下降。1 ~10 mg•L^{-1} 浓度的镍胁迫对向日葵影响不大，可溶性糖的增加可以起到渗透调节的作用，减轻重金属带来的伤害；

高浓度时，植株已经受到较深的毒害，可溶性糖的含量明显降低。

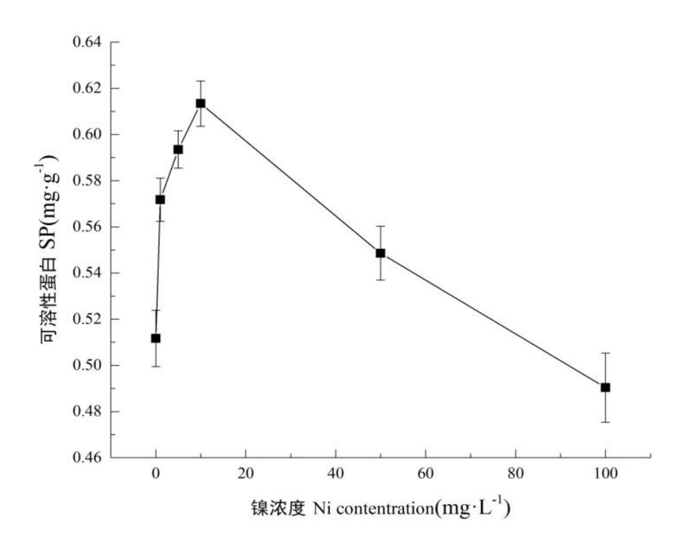


图 3　镍胁迫对向日葵幼苗可溶性糖含量的影响

Fig.3 Effect of Nickel stress on soluble sugar content in *Helianthus annuus* seedlings

2.4　镍胁迫对向日葵丙二醛含量的影响

植物在逆环境下受伤害，其组织或器官膜脂质发生过氧化反应产生丙二醛（MDA），使质膜平衡体系受损。因此 MDA 含量的多少可以反映出植物体受伤程度。

由图 4 可以看出，MDA 的含量随着镍胁迫浓度的增加小幅度上升且都高于对照组。在浓度为 1、5、10、50、100 mg•L^{-1} 的镍胁迫下，MDA 含量一直处于上升趋势，增加率为 0.4%、11.8%、44.8%、62.3%、71.4%。在低浓度镍胁迫下，向日葵幼苗 MDA 含量变化较小，当浓度超出 5 mg•L^{-1} 时，含量显著的增加；到 10 mg•L^{-1} 时，丙二醛含量相对比于 5 mg•L^{-1} 时高出 33%，增加非常显著。说明在低浓度（≤5 mg•L^{-1}）镍胁迫的逆环境下，镍胁迫对细胞膜的伤害不大，而随着镍浓度的逐渐增大，促使丙二醛含量增多，反映向日葵幼苗膜质损伤的程度逐渐加深。

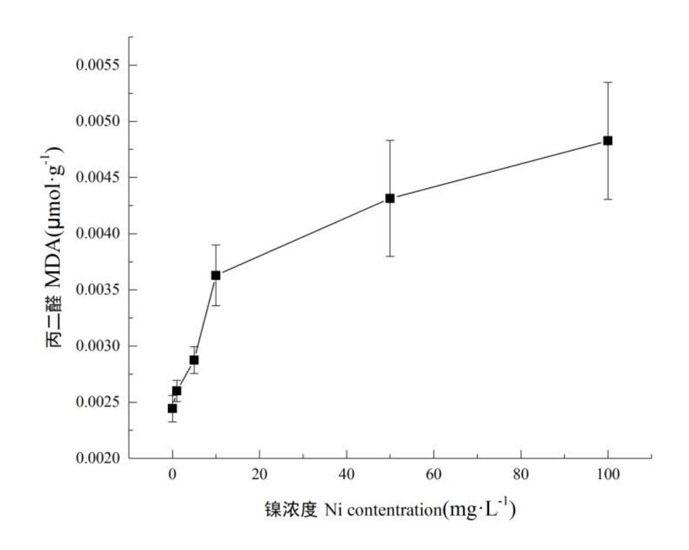


图 4 镍胁迫对向日葵幼苗丙二醛含量的影响

Fig.4 Effect of Nickel stress on the content of malondialdehyde in *Helianthus annuus* seedlings

2.5　镍胁迫对向日葵可溶性蛋白含量的影响

生物体生命活动离不开蛋白质，植物体内的可溶性蛋白几乎都是参与各种代谢的酶类，催化各种化学反应。在重金属胁迫下，其含量变化是反应植物抗逆性的重要指标。

在重金属镍 1 ~100 mg•L^{-1} 的胁迫下，向日葵叶片中的可溶性蛋白含量变化（如图 5 所示），经 1 ~50 mg•L^{-1} 的镍处理，向日葵叶片中可溶性蛋白含量均高于对照组，分别高出 12.0%、15.9%、20.7%、7.6%，100 mg•L^{-1} 的镍处理后，比对照组低了 3.8%。说明低浓度的镍处理刺激可溶性蛋白的合成，以减少镍胁迫带来的毒害；经高浓度的镍处理后细胞代谢活动减慢，可溶性蛋白的合成受到抑制，植物的生长发育受到严重影响。整体看来，镍胁迫明显抑制可溶性蛋白的合成。

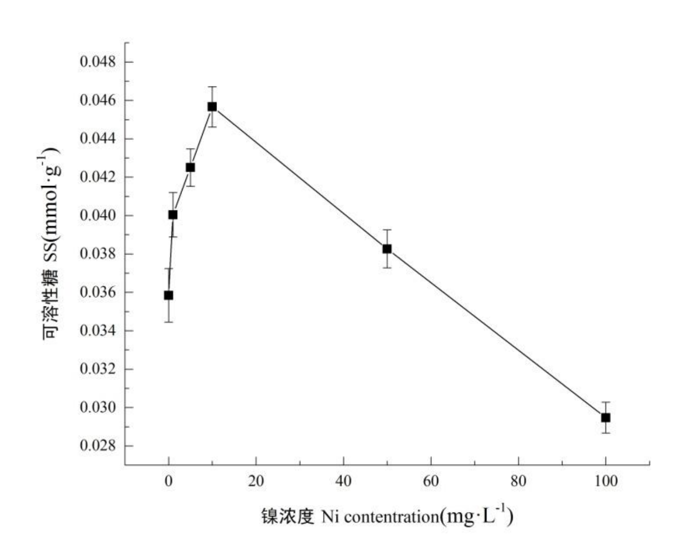


图 5　镍胁迫对向日葵幼苗可溶性蛋白含量的影响

Fig.5 Effect of Nickel stress on soluble protein content in *Helianthus annuus* seedlings

2.6　镍胁迫对向日葵过氧化物酶活性的影响

过氧化物酶（POD）广泛存在于植物体内，能有效清除过量的活性氧，提高植株的抗逆性，是植物重要的保护酶之一。过氧化物酶活性在植物生长发育过程中随胁迫浓度的增加不断发生变化，在抵制外界逆境毒害过程中扮演着重要的角色。

图 6 所示，镍胁迫 12d 后，向日葵叶片的 POD 活性先上升，至最高点后持续下降。经 1 ~10 mg•L^{-1} 镍处理，过氧化物酶活性持续上升，实验组超过对照组 2.1%、10.6%、16.1%，活性最大出现在镍胁迫浓度为 10 mg•L^{-1}。说明低浓度镍有增强植物叶片中 POD 活性的作用。50 mg•L^{-1} 的镍处理，会导致过氧化物酶活性显著下降，相对 10 mg•L^{-1} 而言，降低了 14.2%。虽然活性明显降低，但仍超出对照组 1.8%。在 100 mg•L^{-1} 的胁迫下，过氧化物酶活性低于对照组，说明镍胁迫浓度过高，会导致向日葵叶片中的过氧化物酶活性明显降低。

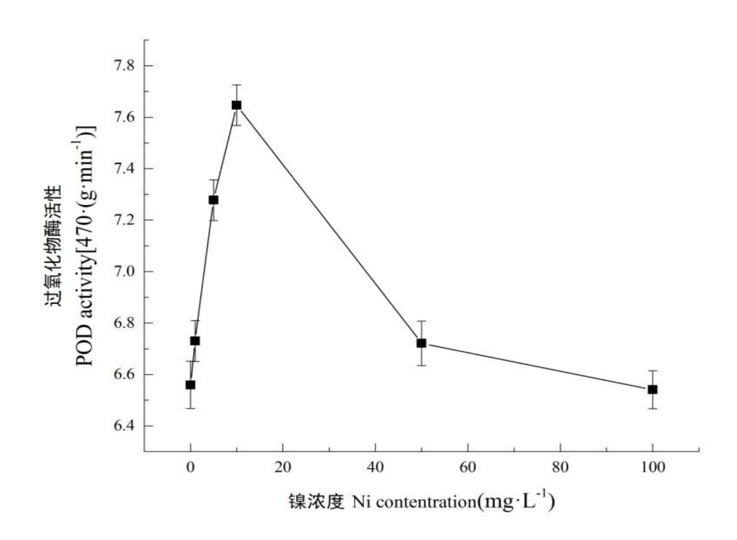


图 6 镍胁迫对向日葵过氧化物酶活性的影响

Fig.6 Effect of Nickel stress on peroxidase activity in *Helianthus annuus* seedlings

2.7 镍胁迫对向日葵游离脯氨酸含量的影响

游离脯氨酸（Pro）具有较强的溶解性，可以起到防止植物组织脱水与减小渗透压的作用。游离脯氨酸在细胞中大量的积累，作为自身的防脱水剂和渗透压剂，对于保证组织的持水力与降低细胞内溶质的渗透势有重大意义。

由图 7 可知，向日葵在镍胁迫下，向日葵叶片中的游离脯氨酸含量随着镍胁迫浓度的增加呈先上升后降低的趋势。当胁迫浓度 1、5 mg•L^{-1} 时，游离脯氨酸含量的增加值比较接近，分别增加了 19.6%、22.1%。当胁迫浓度为 10、50 mg•L^{-1} 时，比对照高出了 38.0%、41.7%，两组增加量明显比前面的大，游离脯氨酸含量最高是在镍胁迫浓度为 50 mg•L^{-1}。经 100 mg•L^{-1} 的镍胁迫，游离脯氨酸含量骤降，比对照组降低了 5.9%。由此可说明，低浓度的镍处理，向日葵叶片中脯氨酸仍不断增加，起到保持细胞渗透势的作用，是适应逆环境的一种表现；100 mg•L^{-1} 时向日葵受镍毒害严重，游离脯氨酸的积累减少，导致向日葵的渗透平衡破坏。

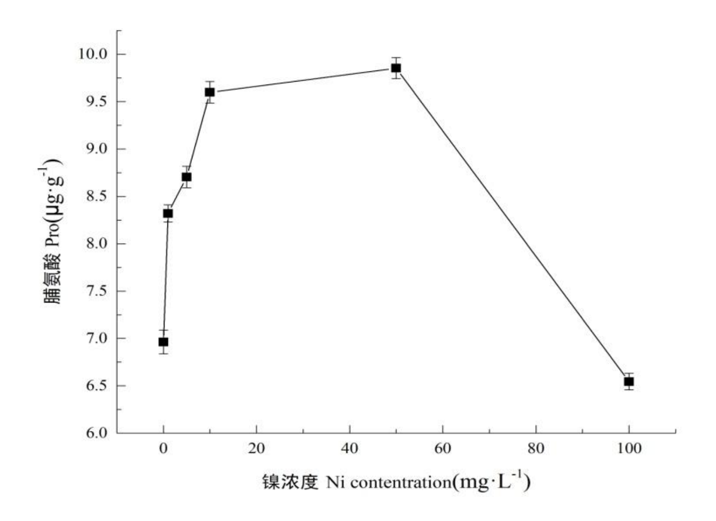


图 7 镍胁迫对向日葵幼苗游离脯氨酸含量的影响

Fig.7 Effect of Nickel stress on free proline content in *Helianthus annuus* seedlings

3 讨论

植物在多种因素共同作用下表现出抗逆性，其生理生化指标是研究植物抗逆能力的基础。镍具有潜在性，无论低浓度还是高浓度都会对植物外观形状、生物量和生理生化过程有一定的影响（刘金华等，2012；赵娜和周米平，2011；鲁艳等，2012）。

在逆境中，植物的 POD、MDA 会发生协调性变化。过氧化物酶在逆境中被激活，有研究表明，过氧化物酶活性随镍胁迫浓度的增加先升后降（赵娜，2011）。本研究表明，有镍溶液加入时，POD 活性几乎无变化，5 mg•L^{-1} 时活性明显上升。当 POD 活性到达一定程度后就开始下降，且下降幅度大，直到低于对照组。表明向日葵幼苗在一定镍胁迫条件下，加强了 POD 活性并激发植株自身防御机制，以清除镍胁迫带来的膜脂过氧化伤害。胁迫浓度过高，过氧化物酶则受到破坏，活性降低。活性降低可能是由于胁迫致使向日葵幼苗细胞膜系统受损，破坏 POD 分子结构，使植物不能耐受高浓度胁迫。实验表明，MDA 含量随镍浓度的增加而增加。在高浓度的镍胁迫下，活性自由基大量生成，机体的清除能力有限，MDA 含量逐渐增加，导致向日葵幼苗膜脂过氧化作用增强，质膜透过性增加（郑爱珍，2005），影响细胞正常代谢，POD 活性降低，说明 POD 这类保护酶对植物膜系统的保护具有限制性。

本实验表明，镍在低浓度时，可以促进向日葵叶绿素合成。高浓度胁迫严重破坏叶绿素合成机制，使机体无法抵制镍毒害。说明向日葵对低浓度镍胁迫有较强的抗性，能正常进行光合作用，叶绿体是较敏感的细胞器之一，在高浓度胁迫下，叶绿体结构遭到破坏，使叶绿素含量下降，光合作用减弱，影响植物体的生长发育。对比图 2 可以发现，镍对叶绿素 b 的毒害作用比叶绿素 a 强，50 mg•L^{-1} 的胁迫下，叶绿素 b 含量下降幅度更大，大概是两者结构存在差异的原因。在 100 ml•L^{-1} 的镍胁迫下，向日葵叶片失绿，出现斑点并伴有灼烧现象，表明此时向日葵幼苗耐受镍毒害达到最大限度，自身防御系统严重破坏。

可溶性糖是光合作用的产物，既是植物体的能量来源，也是渗透调节不可或缺的部分。在黄栌和紫荆的研究中，随胁迫浓度增加，可溶性糖含量呈上升趋势（李国雷等，2004）。有研究表明低浓度胁迫下，可溶性糖含量随镍胁迫浓度增加逐渐上升，可溶性糖的积累可能是机体在逆环境下的一种应急机制，随着胁迫浓度的持续增加，可溶性糖含量开始降低（常云霞，2018）。这说明，向日葵幼苗在高浓度金属胁迫下，叶绿素合成途径受阻，光合作用效率下降，呼吸作用加强，有机物合成减少，运输途径受到阻碍，可溶性糖含量逐渐减少，在植物体内的渗透调节能力受到限制，影响植株的生长发育。有实验表明向日葵幼苗在镍胁迫下，可溶性蛋白的含量先是逐渐上升，随后缓慢下降（张牡丹，2018）。可溶性蛋白合成增强并参与渗透调节，提高其抗逆性，保护自身机制免受伤害；当胁迫浓度超出一定范围，蛋白质合成受阻，植物的这种自我调节机制受到破坏，导致向日葵幼苗生命活动受到影响。

游离脯氨酸是植物在逆环境中重要渗透调节剂之一，可以起到保持机体渗透平衡的作用。大量研究表明（杨树军，2008；张运起等，2003；武春霞等，2008），随着外界胁迫浓度的增加，植物体内的游离脯氨酸含量升高。研究表明，在镍胁迫下，≤50 mg•L^{-1} 时，游离脯氨酸在向日葵叶片中含量与镍浓度呈正相关；当镍浓度达到 100 mg•L^{-1} 时，游离脯氨酸含量极具下降，低于对照组。说明一定浓度的镍胁迫溶液会使植物体内游离脯氨酸含量不断增加，维持体内渗透势平衡，是植物自身采取的一种保护措施；当镍浓度超过一定范围则会导致脯氨酸含量下降，破坏了植物的自我保护。可见，游离脯氨酸在机体内的调节作用受镍胁迫浓度影响较大。

4 结论

通过营养液培养法研究不同浓度的镍胁迫向日葵幼苗后叶片各项生理生化指标变化规律，得出以下结论：低浓度的镍胁迫对向日葵幼苗叶绿素、可溶性糖、可溶性蛋白、过氧化物酶、游离脯氨酸的合成影响不大，植株可以通过自身调节，抵制镍毒害，提高抗逆能力，各生理生化指标不仅表明向日葵幼苗对重金属镍有一定的抗性；也侧面反应镍和向日葵的生长发育状态有一定的相关性，表明向日葵作为观赏性植物可在轻度镍污染的土壤中进行生态修复栽培。

参考文献：

BA QS, ZHANG GS, LING Y, et al., 2017. Physiological effects of root-applying Glycine Betaine on wheat seedling[J]. Acta Bot Boreal–Occident Sin, 37(2):315-320.[巴青松，张根生，凌玉，等，2017. 根施甜菜碱对镍胁迫下小麦幼苗生长生理的影响[J]. 西北植物学报，37（2）： 315-320.]

BAI YJ, SHEN GX, CHEN XH, et al., 2018. Accumulation and transport of nickel in three vegetable crops and their edible safety[J]. J Agro-Environ Sci, 37(8): 1619-1625.[白玉杰，沈根祥，陈小华，等，2018.三种蔬菜对镍累积转运规律及食用安全研究[J]. 农业环境科学学报，37（8）：1619-1625.]

CHANG YX, LI ZL, LI FR, 2018.Effect of IAA on the osmotic adjustment substance and antioxidant properties in *Arabidopsis thaliana* seedling under Cd^{2+} stress[J].J Zhoukou Norm Univ, 35(5):79-82.[常云霞，李姿琳，李芙蓉，2018. IAA 对 Cd^{2+}胁迫下拟南芥渗透调节物质及抗氧化特性的影响[J]. 周口师范学院学报，35（5）：79-82.]

GOMES-JUNIOR RA, MOIDES CA, DELITEFS, et al., 2006. Niekel elicits a fast antioxidant response in *Coffea arabiea* cells [J]. Plant Physiol Biochem, 44:420-429.

GUO P, LIU C, ZHANG HB, et al., 2007. Study on the enrichment ability and tolerance of Pb and Cu in sunflower seedlings[J]. J Soil Water Conserv, 21(6): 92-95, 113.[郭平，刘畅，张海博，等，2007. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性的研究[J].水土保持学报，21(6):92-95,113.]

LI GL, SUN MG, XIA Y, et al., 2004. Study on the dynamic changes of some physiological and biochemical reactions of Astragalus and Cercis chinensis under NaCl stress[J].J Shandong Agric Univ(Nat Sci Ed) , 35(2)：173-176.[李国雷，孙明高，夏阳，等，2004. NaCl 胁迫下黄栌、紫荆的部分生理生化反应动态变化规律的研究[J].山东农业大学学报(自然科学版)，35(2):173-176.]

LI HS, 2000. Principles and techniques of plant physiology and biochemistry experiment [M]. Beijing: High Education Press.[李合生，2000. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京：高等教育出版社.]

LIU JH, YANG JM, ZHANG ZQ, et al., 2012. Effects of nickel application on the growth of soybean seedlings and nickel poisoning[J]. J Jilin Agric Univ, 34(3):311-315.[刘金华，杨靖民，张忠庆，等，2012. 黑土施镍对大豆幼苗生长的影响及镍中毒研究[J]. 吉林农业大学学报，34(3):311-315.]

LU Y, LI XR, HE MZ, et al. , 2012. Effects of Ni and Cu stress on the activity of antioxidant enzymes in *Peganum harmala*[J]. Hay J, 21(3): 147-155.[鲁艳，李欣荣，何明珠，等，2012. Ni 和 Cu 胁迫对骆驼蓬抗氧化酶活性的影响[J]. 草业学报，21(3):147-155.]

LÜ XY, WU SQ, ZHANG Y, et al., 2014. Analysis on variation of main indicators of eutrophication and mutrition level in Taihu lake[J]. J Water Resour Water Eng，25(4) :1-6.［吕学研，吴时强，张咏，等，2014. 太湖富营养化主要指标及营养水平变化分析[J]. 水资源与水工程学报，25(4) : 1-6.］

MOLAS J, 1997. Changes in morphological and anatomical structure of cabbage (*Brassicea* L.) outer leaves and in ultrastructure of their chloroplast caused by an *in vitro* excess of nickel[J]. Photosynthetica, 34(4):513-522.

WANG B, MA F, 2014. Effects of nickel stress on growth and physiological characteristics of 5 species of Cruciferae[J]. Agro-tech Comm, 12:87-89.[王兵，马芳，2014. 镍胁迫对十字花科 5 种植物生长及生理特性的影响[J]. 农业科技通讯，12:87-89.]

WANG LN, 2014. Effects of nickel stress on physiological characteristics, NPK nutrient absorption and yield of Maize [D]. Changchun: Jilin Agricultural University.[王丽娜. 镍胁迫对玉米生理特性、氮磷钾营养元素吸收和产量的影响[D]. 长春：吉林农业大学，2014.]

WU CX, WU HY, ZHU WB, et al., 2008. Physiological response and salt tolerance of halophytes in different saline soils[J]. J Anhui Agric Sci, 36(20):8450-8452.[武春霞，吴海燕，朱文碧，等，2008. 盐生植物在不同盐碱土壤中的生理反应及耐盐性[J]. 安徽农业科学，36(20)：8450-8452.]

XU HF, LIU XG, JIN JM, et al., 2003. Study on sunflower chlorophyll and the specific leaf weight[J]. Agric Syst Sci Integr Res, 19(2): 97-100 [徐惠风，刘兴土，金研铭，等，2003. 向日葵叶片叶绿素和比叶重及其产量研究[J]. 农业系统科学与综合研究，19(2)：97-100]

YANG SJ, ZHANG BX, ZHANG XL, 2008. Evaluation and screening of salt and alkali resistance of different seed sources of American *Gleditsia*[J]. Prot For Sci Technol, (2):7-8,14.[杨树军，张柏习，张学利，2008. 美国皂角不同种源耐盐碱评价与筛选[J]. 防护林科技，(2)：7-8，14.]

ZHANG MD, SAINAO WQ, RAN RL, et al., 2018. Protective effect of attapulgite clay on *Angelica sinensis* seedlings under Cu stress[J]. Guihaia.[张牡丹，赛闹汪青，冉瑞兰，等，2018. Cu 胁迫下基质中凹凸棒石粘土对当归幼苗的保护作用[J]. 广西植物. http://kns.cnki.net/kcms/detail/45.1134.Q.20180629.1035.002.html]

ZHANG YQ, LIU SQ, YANG FJ, et al., 2003. Study on screening and salt tolerance mechanism of salt-tolerant watermelon rootstocks[J]. NW Agric J,12(4):105-108.[张云起，刘世琦，杨凤娟，等，2003. 耐盐西瓜砧木筛选及其耐盐机理的研究[J]. 西北农业学报，12(4)：105-108.]

ZHANG ZA, ZHANG MS, WEI RH, 2004. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agricultural Technology Press: 32-139.[张治安，张美善，蔚荣海，2004. 植物生理学实验指导[M]. 北京：中国农业技术出版社：32-139.]

ZHAO N, 2011. Effects of nickel stress on growth and physiological characteristics of maize and soybean seedlings [D]. Changchun: Jilin Agricultural University.[赵娜，2011. 镍胁迫对玉米、大豆苗期生长及生理特性的影响[D].长春：吉林农业大学.]

ZHAN N, ZHOU MP, 2011. Effect of nickel stress on root growth and membrane protection system of maize seedlings[J]. J Anhui Agric Sci, 39(10):5821-5823.[赵娜，周米平，2011. 镍胁迫对玉米苗根系生长及膜保护系统的影响[J]. 安徽农业科学，39(10):5821-5823.]

ZHAN SJ, LIU HS, DONG XC, 1998. Experimental guidance of plant physiology [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press.[赵世杰，刘华山，董新纯，1998. 植物生理学实验指导[M]. 北京：中国农业科技出版社.]

ZHENG AZ, 2005. Effects of nickel treatment with different nickel concentrations on

physiological and biochemical indexes of maize seedlings[J].J Anhui Agric Sci, 33(1): 2109-2145.[郑爱珍，2005. 不同镍浓度镍处理对玉米幼苗生理生化指标的影响[J]. 安徽农业科学，33(1)：2109-2145.]

ZOU Q, 2000. Experimental guidance on plant physiology [M]. Beijing: China Agricultural Press.[邹琦，2000. 植物生理学实验指导[M]. 北京：中国农业出版社.]